

矢の接触感覚がある 和弓の射撃体験デバイス

熊谷拓真^{†1} 兼松祥央^{†1} 松吉俊^{†1} 三上浩司^{†1}

概要: 弓道などで使用される和弓では、射撃時に矢が手や頬に接触する。そして、矢が身体に触れる感覚は射手の身体動作に対して影響を与える。本研究では実際の和弓射撃と同じタイミングと場所に矢が触れた感覚を提示する和弓射撃体験デバイスを制作する。提案デバイスと Oculus Rift を用いて体験するコンテンツを制作し、ヴァーチャルリアリティを用いた実物の和弓に近い射撃体験が可能になった。

1. はじめに

2010年代以降、「Meta Quest 2」[1]、「PlayStation VR」[2]など、比較的安価なヘッドマウントディスプレイ（以下「HMD」とする）が普及している。加えて、360度撮影やヴァーチャルリアリティ（以下「VR」とする）映像が撮影可能な「Insta360 Pro2」[3]などのカメラが発売されており、VRは注目されている技術である。また、現実世界に情報を重畳表示する拡張現実（以下「AR」とする）はエンターテインメント分野や、医療現場などで広く活躍が期待されており[4][5]、VRと同じく注目されている技術である。VRを用いたゲームにおいては全方位を見られるため高い没入感を与えることができる。HMDと新たなインタフェースを組み合わせることによって、マウスとキーボードなどでは不可能だったゲーム体験ができる。また、HMDには専用の手持ちコントローラが付属している。よりゲーム体験を向上させるためにVRシューティングゲーム用のコントローラとして、「PlayStation VRシューティングコントローラー」[6]が発売された。また、ゲームに応じてプレイヤーにフィードバックを行うデバイスも存在する。「Force Tube」[7]は「Meta Quest 2」付属コントローラと繋げることによって、ゲーム内で銃を射撃した反動を再現できるデバイスのひとつである。また、ARは実際の風景の中にCGで作られた映像を重ねることによって体験を拡張できる。「Pokémon Go」[8]では、ゲーム内のキャラクターがプレイヤーの目の前に見える状態でゲームをプレイできる「AR+モード」[9]が採用されている。また、「Meta quest 3」[10]ではHMDに搭載した2基のカメラを用いたAR体験が可能である。

これらのVR機器とAR機器を活用した弓の射撃体験の仕組みとして、まず、安本ら[11]がAR用のゲーミングデバイスとして洋弓型ゲーミングデバイスを提案した。これは実物のアーチェリー用の弓をデバイスのパーツとして用いている。これにより、弓を引く際の反発、矢を放った時の

振動を再現している。また、安本ら[12]は和弓型ゲーミングデバイスも提案している。これらの研究は弓が射手に与える反発力を提示できる。しかし、弓を実際に引く際には弓だけではなく矢が存在する。特に弓道などで使用する和弓は射撃の一連の動作の際に、図1のように矢が身体の手や頬に接触する。佐藤ら[13]は和弓において、矢の有無が射撃の際の身体動作に影響を及ぼすことを示している。そのため、ゲームでよりリアルな和弓の射撃体験を得るには、身体に矢が接触する感覚も再現することも重要である。

そこで本研究では、実際の和弓の射撃時と同じ場所とタイミングで、手や頬に矢が接触する和弓の射撃体験デバイスの制作を目的とした。これにより、リアルな和弓の射撃体験が可能になり、ゲームへの没入感向上が期待できる。

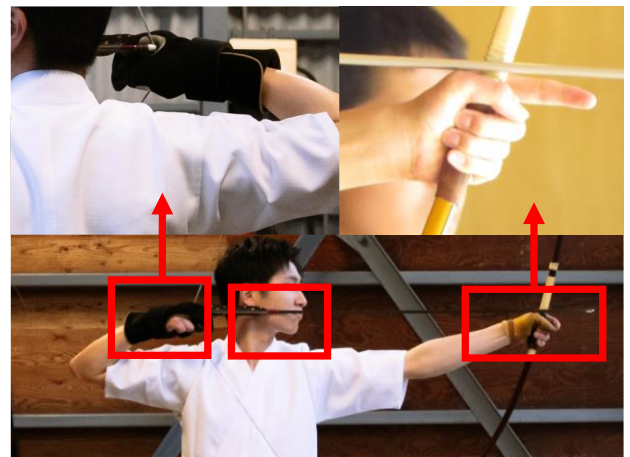


図1 弓射動作時の矢の身体接触位置[14][15][16]

2. 関連研究

2.1 弓型ゲーミングデバイス

安本[11]らはARシューティングゲーム用デバイスの洋弓型ゲーミングデバイスを提案した。安本らはデバイスに付けたプロジェクターを用いて、映像の投影された壁面に

^{†1} 東京工科大学

弓を構えて発射するシューティングゲームを制作した。このデバイスは発射時の反発や振動などを再現するために実物のアーチェリー用の弓を材料として使用した。加えて、このデバイスは搭載した距離センサーで壁面との距離を測り、凹凸がある壁にも映像を正確に投影できる。それによってプレイヤーはリアルな射撃を体験できる。

また安本ら[12]は AR シューティングゲーム用デバイスとして、和弓型のデバイスを提案した。このデバイスは長さが約 221cm の一般的な和弓ではなく、長さが約 140cm の「四半弓」を使用してデバイスを制作した。これを使用したことによって実物同様の弓を引く際の反発などの感覚、離した際の弓の振動を再現し、実物に近い射撃を体験できる。

2.2 和弓の射撃特性について

田中ら[17]は加速度センサーを用いて和弓の矢発射時における弓の振動特性について調査した。実験ではグラスファイバー製、221cm の並寸、15Kg の合成弓を使用した。弓を固定できる発射装置を制作し、弓には加速度センサーを装着した。この研究では次の 5 点を明らかにした。

- 矢射出方向の弓の振動が射手の感覚に大きな影響を及ぼしている
- 制作した装置で計測した振動特性は手で持った場合と大きな差異が見られない
- 引き尺によって振動周波数に変化は見られない
- 弓の短方側のばね定数が長方側に比べて相対的に大きくなる

佐藤ら[13]は弓道初学者を中心に矢の有無が与える影響について調査した。弓道歴 1 年から 3 年までの女子を対象に矢の有無を条件として、2 台のハイスピードカメラで動作全体を撮影した。加えて、ゴニオメーターで右前腕、手関節の角度を測定した。この研究では矢「有り」に対する矢「無し」条件の弓射動作を比較し、次の 5 項目を明らかにした。

- 射手が弓に加える力が小さい
- 弓を持つ左手と逆の右手の距離が近い
- 右手が左手より下方に位置する
- 肩と肘の関節の角度が大きく、前腕の捻りが回内位である
- 一部動作において掌屈度が異なる

このことから特に初学者は、矢がないことによる影響を受けて弓射動作時に射手が弓に十分力を加えることができないことを明らかにした。

佐藤ら[18]は、弦に張力計を付け、弦に作用する力の変化を調査した。使用した弓は 75cm 引いたときの強さが 10Kg、

11Kg、17Kg、18Kg の 4 張で、金属製のリングに 4 ゲージ法で取り付けた。この研究では次の 4 点を明らかにした。

- 弦の張力は弓を引くに従って減少する
- 引き幅が 35cm を過ぎると上弦はほぼ一定になり下弦はそこから再び増加する
- 矢を飛ばす寸前は測定した弓の強さとほぼ同等となる
- 張力の波形は周期的に変化し、その周期が矢の加速度変動の周期と類似している

2.3 弓道練習支援システム

星野ら[19]は弓道経験者が鏡を用いて、自身の射形をチェックする練習法を想定した評価システムの実装と評価を行った。「射形」とは弓道の射撃の動作のことである。弓道歴 1 年以上の指導者と 1 年未満の初心者を 2 人 1 組として実験した。射形の一連の流れを Kinect で撮影して全身の 20 か所スケルトン座標を収集し、正しい射形と間違っただ射形の正規化した骨格データを制作した。それをもとにして、初心者の射形を Kinect で撮影し、システムによる射形の評価を行った。また、同じ射形を指導者が目視して、胴の傾きなど間違っただ射形がどのタイミングで生じたかを評価した。システムの実用性を確かめるために指導者の評価とシステムの評価を比べ、その一致率を比較した。その結果、指導者の目測による評価と提案システムを通して得られた射形の評価は高い一致率を記録した。これらのことから、このシステムは自宅での一人の練習において実用性があることを示したと言える。

両角ら[20]は正しい射形のデータセットを制作した。弓道の練習において各動作を確認できることが有益であると仮定し、その各動作を自動で認識するための骨格データセットを制作できるシステムを開発している。データセットの収集方法として有段者の射形を Kinect v2 で撮影する。その映像から骨格情報の収集、評価し、各動作に対するタグ付けができるシステムを開発した。それによって自動認識のための射形の骨格データセット制作が可能となった。

川村ら[21]は矢を飛ばす感覚に近い練習を道場以外の制約がある場所でも行えるデバイスを提案した。このデバイスはゴム製の矢尻を付けた矢と、それを通すための筒の 2 つから構成されている。矢が飛ばないように筒と糸でつながっている。矢羽根側の端に糸を付けると真っ直ぐ飛ぶが、初学者では発射後に弓の下方にその糸が絡まる。そのため矢尻側へ糸を付けたが、発射後に糸が伸び切り矢尻側が射手側へ戻ってくる。加えて矢羽根側は矢尻部を中心にして回転するという現象によって射手に違和感を与えた。そこでリングに糸を付けてそのリングを矢に付けた。リングは発射後に矢が飛ぶことを防ぐ。加えて、発射前にリングは矢尻側にあり発射後には矢羽根側に移動ことによって、矢

尻側に糸を付けた際の不自然な矢の回転と矢羽根側に糸を固定していた際の弓の下方に糸が絡まることを防いでいる。この研究によって、道場ではなくても安全に矢を飛ばす感覚に近い練習が可能になった。

2.4 本研究の位置づけ

先行研究では弓型ゲーミングデバイスを安本ら[11][12]が和弓型、洋弓型の両方をすでに制作している。それらは実際の素材や弓をパーツとして用いることや反発力の提示することでリアルな射撃体験が可能なることを示した。田中ら[17]と佐藤ら[18]は和弓の射撃時における弓や弦の特性について調査した。佐藤ら[13]は和弓射撃時に矢の有無が射手に影響を与えることを明らかにした。星野ら[19]と両角ら[20]は射手の射形をシステムで解析して、それらのデータが弓道の練習において有用なることを示した。川村ら[21]は実際の和弓の練習に着目し、矢がある感覚に近い練習が道場以外の場所でも可能なデバイス制作した。

先行研究で弓型のゲーミングデバイスが制作されていたが、安全性を確保するために矢が存在しない。そのため佐藤らの矢の有無による影響を考慮できていない。本研究では和弓射撃時の矢の有無に着目し、プレイヤーに弓の反発を提示することに加えて、矢の接触感覚を提示できる和弓射撃体験デバイスの制作を目的とする。

3. 提案手法

3.1 和弓射撃体験システムの概要

本研究では、プレイヤーが提案デバイスを用いて和弓の射撃体験を行うコンテンツを制作した。提案デバイスでは次の3項目を達成する必要がある。

- 射手が実物の弓を引く際の反発を提示する
- 弓を引く際の身体への矢の接触感覚を提示する
- コンテンツ体験の安全性を確保する

コンテンツはプレイヤーによる提案デバイスの操作と連動した和弓射撃体験できるコンテンツを制作する。

「デバイスの射手に対する弓の反発の提示」には、ゴムを使用した。実物のようなデバイス本体を曲げる仕様では引き幅に限界がある。「射手が弓を引く際の身体への矢の接触感覚の提示」は、矢の役割を持つパーツを付けた。接触する場所は図2に示すように、a「左手親指」、b「右手」、c「頬」である。また、デバイスの矢を離しコンテンツ内で矢が飛んだ際には身体のいかなる場所にも矢が接触しない必要がある。「安全性」に関してはプレイヤーとその周囲のもと人にデバイスが接触する可能性を下げる必要がある。プレイヤーはHMDを付けた状態の体験で周囲の確認が難しいため矢を短く、なおかつ飛ばないようにしなくてはならない。

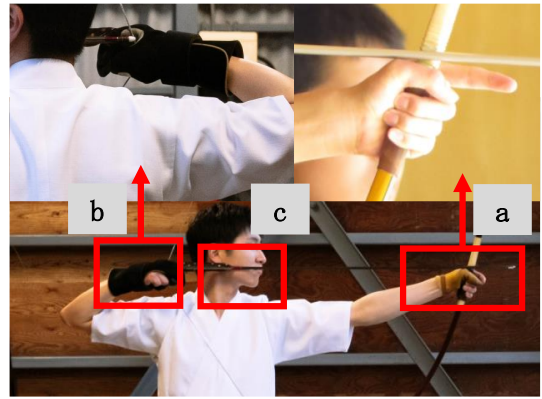


図2 矢と身体の接触位置[9][10][11]

プレイヤーによる提案デバイスの操作とコンテンツを連動した体験には、Unity[22]でコンテンツを制作し、Oculus RiftによるVRで行う。提案デバイスに対してOculus Touchコントローラを付け、提案デバイスに対するプレイヤーの入力と操作によってコンテンツを体験する。提案デバイスとコンテンツ内弓モデルを連動させ、提案デバイスの操作と視覚情報を組み合わせることにより、実物の弓を引く状況に近い感覚をプレイヤーに提示する。本研究では和弓の射撃を体験するコンテンツとして、敵などの特殊な要素が無くルールが単純な弓道の競技を採用した。提案デバイスとコンテンツのシステム概要は図3のようになる。図3の①はHMDによるプレイヤーの体験を示している。プレイヤーの付けたHMDからコンテンツ内のカメラの位置を設定し、その映像をHMD内でプレイヤーへ提示する。図3の②はプレイヤーのデバイスの操作を示している。プレイヤーは提案デバイスを用いてそれに付けられた左手用Oculus Touchを操作し、コンテンツ内で矢の発射を行う。提案デバイスを操作する際に矢の接触感覚とゴムによる反発をプレイヤーへ提示する。

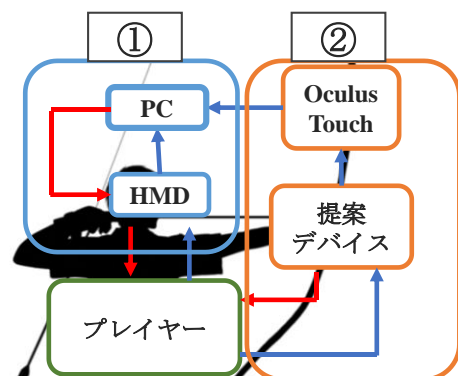


図3 システム概要

3.2 提案デバイスの開発

(1) デバイスの全体図

プレイヤーに矢の接触感覚を与える和弓射撃体験用のデバイスを開発した。図4にデバイスの全体図を示す。

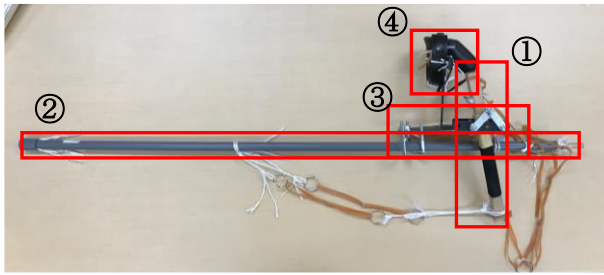


図 4 提案する和弓射撃体験デバイス

提案デバイスは弓、矢、ガイド用金具、左手用 Oculus Touch で構成している。図 4 の①は提案デバイスの握り部である。提案デバイスには主に弓道の練習で用いる実物の「座右弓」[23]を図 4 の①に取り付け、弓の握り部分を実物の和弓に近づけた。田中ら[17]は弓の振動を測定するために手で持った際と同じ振動を測定できる固定用の装置を制作した。弓を引いた際に弓の握り部が矢に対して直角ではないことに注目し、それを固定装置で再現することによって和弓の射撃が再現できることが分かった。そのため図 4 の①のように、座右弓は矢に対して傾いている。また、プレイヤーに反発力を提示するために提案デバイスに付けた座右弓の上端から下端にゴムを付けた。実物の和弓の特徴である 80cm 以上ある大きな引き尺を再現するために本体を曲げるのではなく、図 4 の①の座右弓に付けたゴムを用いている。田中ら[17]の研究で、実物の和弓は短方側のばね定数が大きくなることがわかっている。これを再現するために、座右弓の上方と下方に取り付けたゴムの強度を変更した。図 4 の②は実物における矢を再現したパーツである。これは木棒を塩化ビニルパイプ（以下「塩ビパイプ」とする）の内部に通すことによって再現している。図 4 の②の矢の 2 つのパーツが指示棒のように伸縮することによって引いた際の長さを確保している。デバイスを扱うときにはこれが身体に接触することによってプレイヤーに矢の接触感覚を提示する。図 4 の③のガイド用金具は発射した際に、矢が予測していない位置へ移動することを防いでいる。また、金具によって発射後には発射前の位置に戻るようになっている。これによって、HMD で手元が見えない状態でも再び矢を放つことができるようにする。図 4 の④は左手用 Oculus Touch でプレイヤーによるデバイスの操作をコンテンツ内に反映している。プレイヤーが図 4 の②の矢を引いた際に左手用 Oculus Touch のトリガーボタンを入力する。コンテンツ内ではトリガーボタンの入力力で矢の発射している。

(2) 矢の射出時の動き

射出時の矢の動きについて述べる。図 5 に矢が縮んでいる状態と伸びている状態を示す。

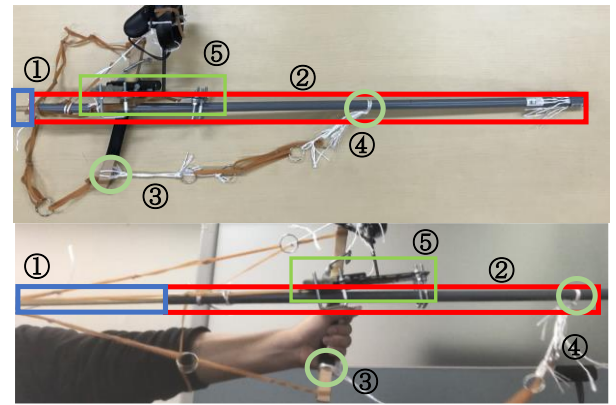


図 5 上図矢縮時、下図矢伸時

図 5 中の①は矢で実物の矢の太さに近い直径 1cm の木棒を使用した。また、木棒の前方には木棒を格納する機能と矢の長さを確保するための図 5 の②の塩ビパイプを付けた。この塩ビパイプは内直径 13mm の VP-13 である。加えて、塩ビパイプの先端にはキャップを装着し、木棒が万が一飛んでいくことを防いでいる。

実際に和弓を射撃する際の引き尺は大きい。使用される矢は 80cm 以上になり、長いものは 100cm 以上になる。そのため一本の棒を使用すると、デバイスの握り部分から約 1m が常に飛び出し、引いて離れた際には速度が付いた状態でプレイヤーの前方へ飛び出すことになり、室内で VR ゲームとして体験するには非常に危険であり、前方へ飛び出す幅を小さくしなくてはならない。そのため提案デバイスでは、図 5 の下図のように伸縮する仕組みにすることによって引いた際の長さを確保することに加え、前方へ飛び出す幅を小さくした。矢に使用した木棒と塩ビパイプはゴムでつながっている。そして、塩ビパイプと図 5 の⑤の金属ガイドはゴムでつながっている。それによって図 5 の下図のようにプレイヤーが引いた際には伸びる。離れたときには図 5 の上図のような元の位置に戻る。

プレイヤーが矢を離れた際、飛ばないように図 5 の③と④の部分につながっている。HMD を用いた VR ゲームでは自分の周囲を確認できない。そのため矢などを飛ばすことは非常に危険である。このことから本研究の提案デバイスでは矢を飛ばさずに体験できるシステムとした。塩ビパイプと弓を糸のみでつなげた際にはプレイヤーに矢を停止させる際の大きな衝撃による違和感を与えてしまった。そのため、図 5 の③と④を繋ぐ糸と糸の間にゴムを入れ、緩やかに停止させることによって衝撃を緩和している。また、弓側の糸を図 5 で示した③の位置につけることによってプレイヤーがデバイスの矢を離し、矢が停止した際に矢が傾き、プレイヤーの左手親指へ接触しなくなる。それによって、実際に矢を飛ばした際に矢が射手の親指から離れることを再現している。

(3) 矢こぼれ防止のガイド用金具

矢こぼれ防止のためのガイド用金具について述べる。図 6 に、矢こぼれ防止のためのガイド用金具を示す。

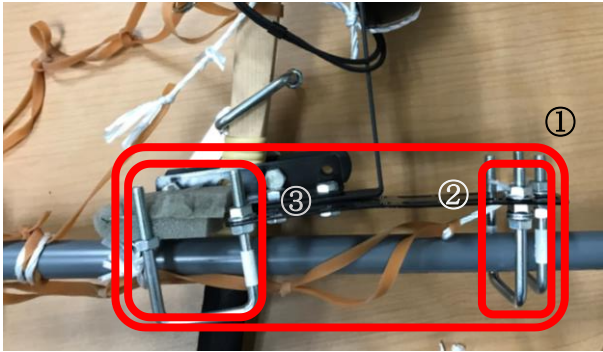


図 6 デバイスのガイド用金具

図 6 に示すガイド用金具はプレイヤーが矢を離した際に予測していない位置へ動くことを防いでいる。図 6 の②のガイド用金具は矢尻側が前方ではない方向へ向くことを防いでいる。実物の和弓にはこのような機能はついていない。しかし、このデバイスでは弦の強度と弓の反発力が実物の和弓と比べて弱い。そのため、ガイド用金具が無いと矢が射手の左手親指から落ちる「矢こぼれ」と同じ現象が生じる。それによって HMD を装着したプレイヤーの体験を損なう可能性がある。また、図 6 の③のガイド用金具はプレイヤーが矢を離した後に矢が金具より外側へずれることを防いでいる。

(4) コンテンツ内の矢の射出方法

コンテンツ内で矢のモデルを発射するためのデバイスの仕組みについて述べる。

左手用 Oculus Touch のトリガーボタン前方にはゴムがついている。このゴムは塩ビパイプの後端側と紐とゴムでつながっている。矢を引いた際にはトリガーボタン前方のゴムが紐によって引かれる。それによって、左手用 Oculus Touch のトリガーボタンが入力される。矢を離した際には、その入力が解除される。

3.3 和弓射撃体験用コンテンツの開発

体験用コンテンツは Unity を用いて制作した。プレイヤーは HMD を付けてデバイスを左手に持って体験する。図 7 と図 8 にコンテンツの映像とデバイス体験の様子を示す。

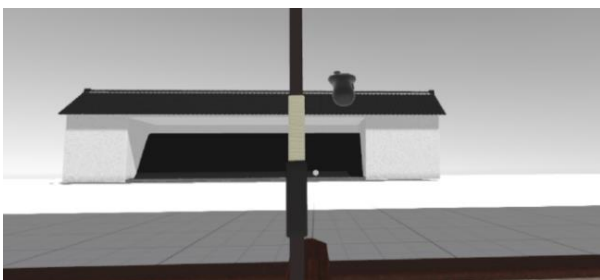


図 7 HMD 内映像

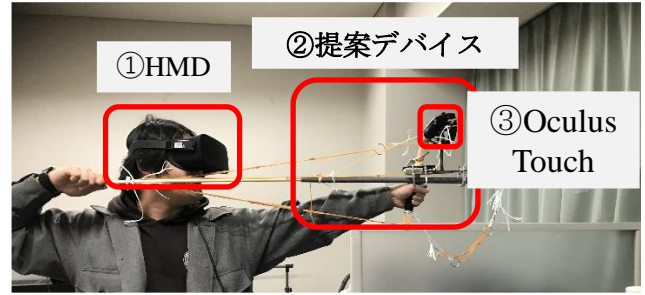


図 8 体験の様子

Oculus センサーで図 8 の①HMD の位置と②和弓デバイスについての③左手用 Oculus Touch の位置を読み取る。ゲーム内の左手用 Oculus Touch モデルの位置をもとにして弓のオブジェクトの座標を設定する。デバイスの弓を引き、矢を離すことによってゲーム内で矢が放たれる。一連の流れを図 9 のフローチャートに示す。図 9 内の「コントローラ」は図 8 の②の提案デバイスについている③左手用 Oculus Touch である。

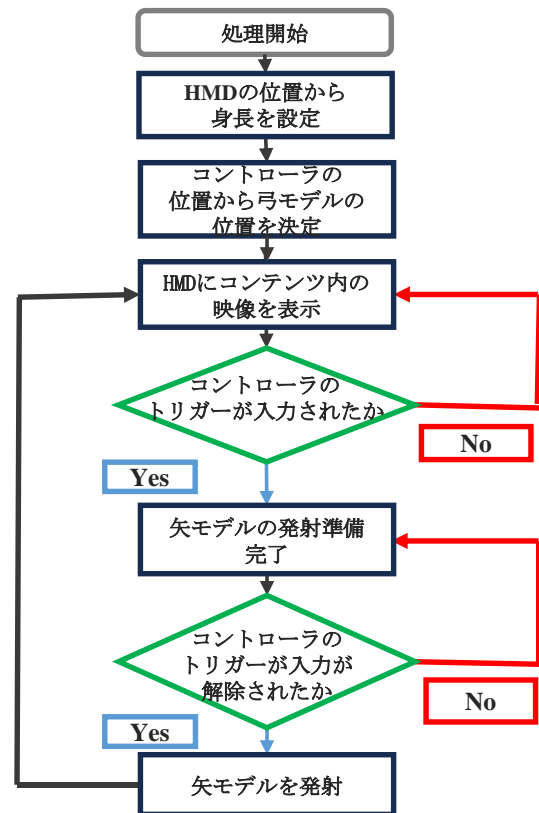


図 9 フローチャート

コンテンツの内容は「全日本弓道連盟」[24]の定める「弓道競技規則」[25]の「近的競技」をもとにして制作した。コンテンツ内のプレイヤーからの的までの距離が 28m、的は直径 36cm の霰的、的は中心がプレイヤーの立つ道場の床から 27cm の高さ、地面に対して約 5 度傾いている。

4. まとめと今後の展望

和弓は射撃時に矢が体に接触する。それを再現して実際に矢が体へ接触する和弓射撃体験デバイスの制作を目的とした。矢に指示棒のような伸縮構造を持たせたことによって、デバイスのサイズを小さくすることができた。座右弓を用いたことによって握る感覚は実物の和弓と比べても違和感が少ない。また、射撃時には矢を急停止させるのではなくゴムによって緩やかに停止することによって、射撃時の違和感を減少することができた。体験のさらなる向上とデバイスの改善を行いながら、今後は弓道の経験者と未経験者の両者にデバイスとコンテンツを体験してもらい、評価実験を行う。

5. 参考文献

- [1] “Meta Quest 2”. <https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/>, (参照 2023-12-08).
- [2] “PlayStation VR”. <https://www.playstation.com/ja-jp/ps-vr/>, (参照 2023-12-08).
- [3] “Insta 360 Pro2”. <https://www.insta360.com/jp/product/insta360-pro2>, (参照 2023-12-08).
- [4] “患者の体内をダイレクトに確認、医療×AR 企業が450万ドル調達”. <https://www.moguravr.com/mediview-xr-funding/>, (参照 2023-12-20).
- [5] 中口俊哉. 医療分野に応用される XR 技術の動向. 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ. 2023, Vol 16, No 3, P 167-175.
- [6] “PlayStation VR シューティングコントローラー”. <https://www.playstation.com/ja-jp/accessories/playstation-vr-aim-controller/>, (参照 2023-12-08).
- [7] “Force Tube”. <https://www.protubevr.com/en/vr-accessories/168-forcetube-haptic-gunstock.html>, (参照 2023-12-08).
- [8] “Pokémon Go”. <https://www.pokemongo.jp/>, (参照 2023-12-20)
- [9] “AR+モードでポケモンを捕まえる”. <https://niantic.helpshift.com/hc/ja/6-pokemon-go/faq/28-catching-pokemon-in-ar-mode/>, (参照 2023-12-20).
- [10] “Meta Quest 3”. <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>, (参照 2023-12-20).
- [11] Yasumoto, M. and Teraoka, T.. Electronic Bow Interface 3D. SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies, 2015, Article No 11, p 1-2.
- [12] Yasumoto, M. and Ohta, T.. The Electronic Bow Interface. Virtual, Augmented and Mixed Reality: Systems and Applications, 2013, Vol 8022, P 436-442.
- [13] 佐藤夢女, 大高千明, 藤原素子. 弓射動作における引手の運動学的特性. 日本体育・スポーツ・健康学会, 2021, Vol 71.
- [14] “弓道をする男性 5”. photo-ac.com/main/detail/26549988&title=弓道する男性5, (参照 2023-12-15).
- [15] “弓道”. <https://www.photo-ac.com/main/detail/1205889&title=%E5%BC%93%E9%81%93>, (参照 2023-12-15).
- [16] “弓道する男性 28”. <https://www.photo-ac.com/main/detail/26550217&title=%E5%BC%93%E9%81%93%E3%81%99%E3%82%8B%E7%94%B7%E6%80%A7%EF%BC%92%E9%81%93>, (参照 2023-12-15).
- [17] 田中禎一, 谷口浩平, 高橋良明, 高橋辰郎. 弓の振動特性に関する研究. 熊本高等専門学校研究紀要, 2011, Vol 3, P 7-14.
- [18] 佐藤明, 小林一敏. 和弓の弦に関する力学的特性, 1981, Vol 13, No 2, P 18-19.
- [19] 星野直紀, 小宮山撰, 盛川浩志. 射形モーションデータを用いた弓道訓練システムの実装と評価. 情報処理学会, 2017, Vol 1, P 287-288.
- [20] 両角貴弘, 大園忠親, 新谷虎松. 弓道練習支援システムにおける射法八節の認識のためのデータ収集について. 人工知能学会, 2018.
- [21] 川村自行, 北本拓, 一正孝. 弓道初心者指導用の特別練習矢の試作について. 武道学研究, 1982, Vol 14, No 2, P 86-87.
- [22] “Unity”. <https://unity.com/ja>, (参照 2023-12-08).
- [23] “座右弓”. <https://www.koyama-kyugu.com/products/detail/44>, (参照 2023-12-08).
- [24] “公益財団法人全日本弓道連盟”. <https://www.kyudo.jp/>. (参照 2023-12-08).
- [25] “弓道競技規則”. https://www.kyudo.jp/pdf/documents/play_rules.pdf, (参照 2023-12-08).